

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0046-04

高功率激光器的高速率外调制技术

李明秋¹ 李洪祚¹ 姜会林² 姜淑华¹

(¹ 长春理工大学电信工程学院, 吉林 长春 130022; ² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 高功率激光器的高速率外调制技术是空间光通信发射系统中的关键技术。系统采用光纤耦合的激光器,有效减少了传输媒质对激光功率的损耗。为了获得大功率、高速率的激光调制信号,采用 1 mm 光输入口径的铌酸钽晶体电光调制器进行光强度调制,电光调制器的调制带宽为 1 GHz,调制方式选用外调制方式。为了保证调制器工作在线性区域,同时降低对电光调制器的驱动电压的要求,系统采用了自动偏置控制技术。通过加正弦波和方波信号进行调制实验,系统实现了激光器调制速率 300 Mb/s,输出功率 100 mW 的指标要求。

关键词 光通信; 高功率; 电光调制器; 激光器; 自动偏置控制

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0046

High-Speed Outer-Modulation Technology of High-Power Laser

Li Mingqiu¹ Li Hongzuo¹ Jiang Huilin² Jiang Shuhua¹

¹ School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

² School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The high-speed electro-optical modulating technology of the high-power laser is the key technology for space optical communication transmission system. This system adopts a fiber-optical coupled laser, so it has effectively decreased the spoilage of transferring medium to the laser power. In order to obtain high-power, high-speed laser modulation signal, the system adopts 1mm-diameter of the LiTaO₃ electro-optical modulator. The bandwidth of the electro-optic modulator of this system is 1 GHz, and modulation type adopts the outer modulation. Moreover, in order to ensure the modulator work in the linear region and reduce the requirement to electro optical modulator drive voltage, this system uses the automatic offset control technology. It shows that the system can satisfy the requirement of 300 Mb/s laser modulating velocity and 100 mW output power by sinusoidal signal and square signal experiment.

Key words optical communication; high power; electro-optical modulator; laser; automatic offset control

1 引 言

国内从 20 世纪 90 年代初期开始进行空间激光通信研究,主要从高功率光源及高码率电光调制技术,精密、可靠的光束控制技术和大气信道等几个方面进行研究,已在单元技术实验系统等方面取得一定的成果。在调制方式上,由于内调制技术目前不能实现高输出功率,要实现远距离的空间激光通信,多采用外调制、强度调制方式^[1]。

为了提高空间激光通信发射系统的传输速率和光输出功率,本文对空间光通信发射系统中的关键

技术—高速率电光调制技术进行研究,并通过实验验证其可行性。

2 发射系统的组成原理

空间光通信发射系统以电光调制器(EOM)为核心,由光学和电学两部分组成,其中光学部分由光纤耦合器和电光调制器等组成。电学部分由激光器驱动电路、供电电源、温度功率控制电路(TPCC)、偏压电路、信号驱动电路和编码控制电路等组成。激光器驱动源工作模式可控,使激光发射参数具有

自动控制功能。发射系统的原理框图如图 1 所示。

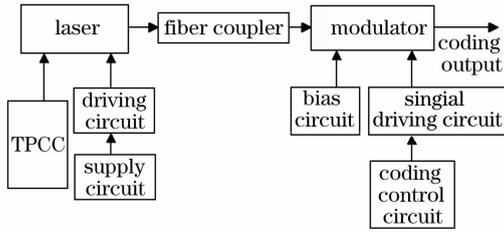


图 1 发射系统的原理框图

Fig. 1 Principle diagram of emission system

由于激光器发出的激光发散角很大,约有 24° , 要想让激光通过电光调制器就要对其进行聚光处理,所以本系统采用了自聚镜来对激光进行聚光处理,也就是在起偏器前加上自聚镜,这样发散角度就能减小到约 1.2° 。这样激光通过起偏器之后进入电光调制器,通过在电光调制器上加调制电压实现对激光束的调制。

3 光源的选择

光源的选择主要考虑了三个方面:

1) 波长必须满足大气传输低损耗窗口。在大气激光通信中,大气的“通信窗口”仍是工作波长选择的重要依据。大气信道中存在背景光,因此在选择光源的工作波长时,不仅要考虑低损耗窗口,还要注意避开背景光的高辐射谱段。对于常用的红外激光波段,810~860 nm、980~1060 nm 和 1550~1600 nm 波段都是良好的大气窗口。考虑到器件的可行性,本系统选择了 810~860 nm 半导体激光器作为发射系统光源。

2) 飞机与卫星之间的距离为 4 万公里,传输过程存在着严重功率损耗,激光束在大气中传播时,光能量不仅受到大气吸收、大气散射而衰减,还会因光束的发散造成接收光功率损耗。为在飞机与卫星之间建立可靠的低误码率通道,功率适当的激光器是必不可少的条件。设发送光功率为 P_s ,激光束为高斯光束,截面上光功率分布可描述为

$$P(r) = P_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (1)$$

式中 ω_0 为高斯光束束腰半径, P_0 为光功率分布峰值处单位面积内的光功率。 P_0 与 P_s 的关系为:

$$P_s = \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} P_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega_0^2}\right) r dr d\varphi = \frac{\pi \omega_0^2}{2} P_0, \quad (2)$$

式中 ω 为光束半径。

当波长为 λ 的高斯光束在自由空间传播距离 L

后,光束半径为

$$\omega(L) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

由(3)式可见,随着距离的增加,激光束的光斑面积越来越大,单位面积内的光能量越来越小。对于口径一定的接收端,接收到的光功率也就减小,这可看作是光束在自由空间的传播损耗。还可见,在通信距离一定的情况下,工作波长增大,传输损耗也将增大;而原始光束束腰半径增大,则可减少传输损耗。

3) 要求激光束具有很小的发散角。半导体激光器光束的发散特性可用发散角来描述。发散角定义为光功率密度下降为最大辐射方向功率密度的一半的两个方向之间的夹角。发散角越小,方向性越好。

根据传输率及误码率的要求确定信噪比,根据信噪比公式求出角位置数字转换器(APD)所需要的探测功率 P_r ,可计算出激光器所需发射功率大于 1.5 W,考虑电光调制器调制深度及透射率,本系统中采用美国某公司的 HBS8XX 可控式半导体激光器。

具体设计参数为:激光器波长:810 nm 和 830 nm;发散角:1.2 mrad。

4 调制方式的选取

在采用外调制技术时,晶体的电光效应本身不会限制调制器的频率特性,调制器的调制特性主要受外电路参数的限制,其频率啁啾特性主要受渡越时间的影响且与调制信号的速率关系不大,从而克服了色散影响,增大了传输距离^[2]。总体来说外调制的优点就是高速率、大消光比、大光功率和消除半导体激光器内调制产生的光功率跳变的啁啾现象^[3]。使用外调制技术可提高信号的传输速率,实现光信号的远距离传输。本系统采用外调制方式。

5 电光调制器的选取

调制器的频带受光波波速与调制波速度失配的制约。要进一步加宽频带必须使光波与调制波匹配。可采用在平行平板之间插入晶体调制器的方法^[4]。调制波以横磁(TEM)波的形式进行传播,其相位速度接近光波速度。这种行波型电光调制器的频带 Δf 与调制功率与光路长度 L 成反比。用大小为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 的 LiTaO_3 制成的调制器可取得高达 2.2 GHz 的宽频带。当调制频带为 600 MHz 时,光路长度 L 不能取得过长^[5,6]。本系统采用的光路不超过 10 cm。

本系统选取的是美国 Quantum 公司的 TWAM-II 型电光调制器,采用的是横向调制,通过在它两侧加上起偏器和检偏器实现了强度调制。

5.1 光输入功率的设计

电光调制器最大输入光强 1 W/mm^2 ($\lambda = 1.6 \mu\text{m}$),光谱范围为 $1.6 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 。图 2 表示电光调制器的最大输入功率和光波长之间的关系,图 3 表示电光调制器的调制深度和波长之间的关系。

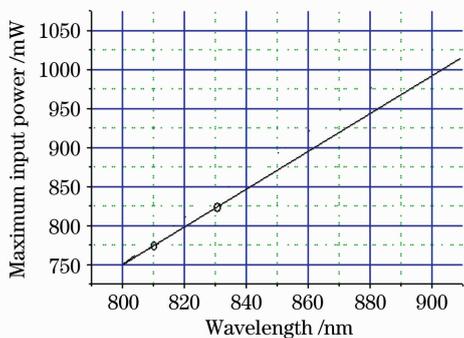


图 2 电光调制器的最大输入功率和光波长之间的关系

Fig. 2 Relation of maximum input power and optical wavelength of electro-optic modulator

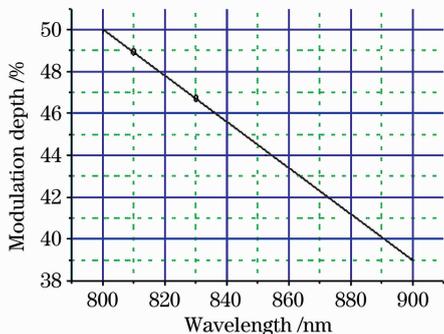


图 3 电光调制器的调制深度和波长之间的关系

Fig. 3 Relation of modulation depth and wavelength of electro-optic modulator

5.2 光束发散引起的光损耗计算

如图 4 所示为激光耦合传输光路原理图。

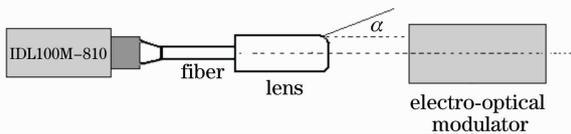


图 4 激光耦合传输光路原理图

Fig. 4 Principle diagram of laser coupling transmission optical path

光纤数值孔径为 0.22 ,芯径为 $100 \mu\text{m}$,在透镜后光束发散角(2α)为 0.02 rad ,激光波长为 $0.81 \mu\text{m}$,电光调制器铌酸钽折射率(n_e)为 $2.18^{[6]}$ 。电光调制器内发散角为 $2\alpha' = 2\alpha/n_e = 0.009 \text{ rad}$ 。电光调制器

出射口光孔径为 $(1+0.009 \times 30) \text{ mm} = 1.27 \text{ mm}$ 。

由于 $1/(1.27)^2 \approx 0.62$,所以光功率损耗为 38% 。

5.3 透射率计算及输出功率估算

调制器透射率^[7]:

$$\eta = \frac{I_o}{I_i} = \sin^2\left(\frac{\pi V}{2V_\pi}\right), \quad (4)$$

式中 I_o 为调制器输出光强, I_i 为调制器输入光强, V_m 为调制器电压, V_π 为调制器半波电压。

根据电光调制器的技术指标,已知参数为 $V_\pi = 120 \text{ V}$, $V_m = 45 \text{ V}$,由(4)式可得

$$I_o = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{V_m}{V_\pi}\right) I_i = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{45 \text{ V}}{120 \text{ V}}\right) I_i = 0.33 I_i. \quad (5)$$

当 $I_i = 775 \text{ mW}$,则 $I_o = 255.75 \text{ mW}$ 。

再考虑电光调制器吸收损耗为 0.005 ,光束散角(20 mrad)引起的损耗为 40% 。

当 $I_i = 775 \text{ mW}$ 时, $I_o = 255.75 \times 0.995 \times 0.6 \approx 152.68 \text{ mW}$ 。

5.4 激光器驱动源电功率估算

激光器的功率效率

$$\eta_p = \frac{P}{VI + I^2 R_s}, \quad (6)$$

式中 P 为激光器辐射的光功率, V 为 p-n 结的正向工作电压, I 为工作电流, R_s 为串联电阻。将 $P = 1.5 \text{ W}$, $V = 2 \text{ V}$, $I = 2.2 \text{ A}$, $R_s = 0.352 \Omega$ 代入(6)式,得 $\eta_p = 25.6\%$ 。

激光消耗的电功率

$$VI + I^2 R_s = 5.852 \text{ W} \approx 5.9 \text{ W}.$$

驱动源效率 $\eta = 0.7$,电功率 $P_1 = 7.67 \text{ W}$,故选择电功率为 8 W 的激光器电源。

5.5 电光调制驱动器的选取

电光调制器的半波电压 $V_\pi = 120 \text{ V}$ 。则 V_π 所需的驱动器的射频(RF)功率

$$P_\pi = \frac{V_{\pi\text{RMS}}^2}{Z} = \frac{V_\pi^2}{8Z}, \quad (7)$$

式中 Z 为调制器阻抗。将 $Z = 50 \Omega$, $V_\pi = 120 \text{ V}$ 代入(7)式,得 $P_\pi = 35.28 \text{ W}$ 。因此, 45 V 调制电压射频功率为 $P_{\text{RMS}} = 4.96 \text{ W}$ 。

本系统选取的是 Quantum 公司的 3101 型电光调制驱动器。

5.6 自动偏置控制器的设计

电光调制器只有工作点选在线性区的中点时,输出波形最大且不失真。所以电光调制器的偏置电压必须严格工作在线性区的中点(半波电压 V_π 的

一半),工作点的偏置可通过在光路中插入一个透光轴平行于电光晶体 X 轴的 $\lambda/4$ 波片(相当于附加一个固定相差 $\delta=\pi/2$)作为“光偏置”,也可加直流偏置电压来实现^[8]。

由于外调制器的半波电压 V_{π} 会因温度变化及晶体老化等原因发生变化,本文采用了自动偏置控制电路,从而能够提高线性度^[9]。自动偏置控制电路的原理是系统设有光电探测器,当检测到偏置电压偏离线性区的中点即半波电压的一半时,由控制单元控制调节使偏置电压回到半波电压的中点,从而保证工作点始终在线性区。

本文选取的是 Quantum 公司的 33C 型自动偏置控制器,可用于连续信号系统。平均输入功率被采样,然后和一个平均调制光功率的样本相比较。由于直流偏置电压的引入,静态工作点 Q 被设定在 $V=V_{\pi}/2$ 上,这样在小信号调制信号输入的条件下,系统工作在线性区域。

6 加正弦波调制实验

实验目的是测试调制器及其驱动器的调制性能。首先加一正弦波作为调制波,通过改变输入电压,也就是改变输入调制信号的幅度,观察经过调制器后而输出信号的幅值变化。由图 5 中输出电压/输入电压 (U_o/U_i) 的曲线可见,它基本上满足 $-0.707(-3 \text{ dB})\sim 0.707(+3 \text{ dB})$ 的变化范围,基本上达到了调制驱动器的带宽要求。

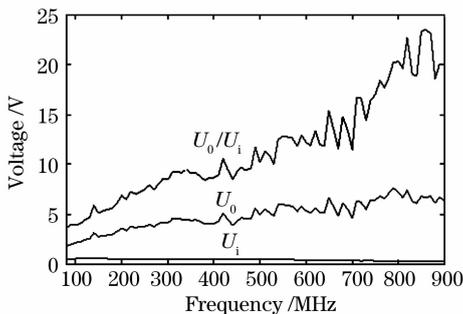


图 5 调制后的输出电压与输入电压的关系曲线

Fig. 5 Input voltage versus output voltage after modulation

7 结 论

在进行详细的理论分析的基础上,研制了激光发射系统。采用了光纤耦合的激光器,有效地减少

了传输媒质对激光功率的损耗。激光器的最大激光输出功率为 1 W,且可通过电流计进行调解,满足系统的要求;选用外调制方式、自动偏置控制技术和数字调制编码技术,使激光器能稳定可靠地工作。针对电光调制系统的输出效率、调制速率、电光调制器的驱动电压,根据试验结果对系统进行了多次优化改进,实现了激光器调制速率 300 Mb/s,输出功率 100 mW 的指标要求。

参 考 文 献

- 1 Guo Yubin, Huo Yujia, Jin Jiangtao *et al.*. 10 Gbit/s fiber-optic transmission system using a LiNbO₃ external modulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(1): 22~26
- 郭玉彬,霍佳雨,靳江涛等. LiNbO₃ 外调制器的 10 Gbit/s 光纤传输系统[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(1): 22~26
- 2 Huang Hengpei, San Haisheng, Zhang Jiabao *et al.*. Measurement of LiNbO₃ modulator frequency response using small signal power measuring technique[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **17**(1): 37~40
- 黄亨沛,伞海生,张家宝等. LiNbO₃ 电光调制器的小信号功率测试法研究[J]. *光电子 • 激光*, 2007, **17**(1): 37~40
- 3 Chen Lei, Yu Changtai. Design and fabrication of novel standing wave electro optical modulator for getting large modulation index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1089~1094
- 陈磊,于长泰. 用于获取大调制度的驻波型电光调制器的设计与制作[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1089~1094
- 4 Ding Guoqing, Deng Zhubin. The extinction ratio of 2.5 Gbit/s optical transmitter modules and the error code characteristics of optical receiver modules[J]. *Study on Optical Communications*, 2001, (1): 52~55
- 丁国庆,邓柱斌. 2.5 Gbit/s 光发射模块消光比与光接收误码特性[J]. *光通信研究*, 2001, (1): 52~55
- 5 Cheng Wang, Liang Kun, Wu Boyu *et al.*. Polymeric electro optic modulators with coplanar waveguide traveling wave-electrode[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(6): 645~649
- 陈旺,梁琨,吴伯瑜等. 聚合物共面波导行波电极电光调制器[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(6): 645~649
- 6 S. P. Dye, N. J. Gomes. Dual-modulation compensation for optical intensity modulator nonlinearities [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 72~74
- 7 Cui Haijuan. *Research on Broadband LiNbO₃ Electrooptical Modulators with Integrated optical Waveguides* [D]. Chengdu: University of Science and Technology, 2003. 30~32
- 崔海娟. 集成光波导宽带 LiNbO₃ 电光调制器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003. 30~32
- 8 Michele Goano, Francesco Bertazzi, Paolo Caravelli *et al.*. A general coformal-mapping approach to the optimum electrode design of coplanar waveguides with arbitrary cross section[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(9): 1573~1580
- 9 Xiao Shengli, Chen Liju, Zhu Feng. Pockels effect and optical modulator[J]. *Physics and Engineering*, 2007, **17**(5): 33~35
- 肖胜利,陈利菊,朱峰. 普克尔斯效应与光调制器[J]. *物理与工程*, 2007, **17**(5): 33~35